

УДК 621.91

Манохин А.С., канд. техн. наук,
Клименко С.А., д-р техн. наук, Киев, Украина
Криворучко Д.В., д-р техн. наук, Сумы, Украина
Рыжов Ю.Э., канд. техн. наук, Найдено А.Г., канд. техн. наук, Киев, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛООПТИКИ, ОБРАБОТАННЫХ АЛМАЗНЫМ МИКРОТОЧЕНИЕМ

Наведено результати комп'ютерного моделювання стану поверхневого шару деталей металооптики з алюмінієвого сплаву при алмазному мікроточінні. Розглянуто вплив на ступінь пластичної деформації поверхневого шару виробу режимів різання і геометричних параметрів різця з монокристалічного алмазу.

Представлены результаты компьютерного моделирования состояния поверхностного слоя деталей металооптики из алюминиевого сплава при алмазном микроточении. Рассмотрено влияние на степень пластической деформации поверхностного слоя изделия режимов резания и геометрических параметров резца из монокристаллического алмаза.

The results of computer modeling of surface layer of alumin metal optic parts under conditions of diamond turning has been shown. The influence of cutting conditions and geometric parameters of a single-crystal diamond tool on the surface layer strain are discussed.

Введение. Моделирование процесса резания методом конечных элементов является актуальной темой современных научных исследований в области металлообработки. За более чем тридцатипятилетнюю историю развития этого направления различными научно-исследовательскими школами было разработано большое количество моделей рабочих процессов резания как в 2D, так и в 3D постановке, моделирующих образование как сливной, так и элементной стружки, использующих универсальное (ABAQUS, DEFORM, LS-DYNA) и специальное (ThirdWave AdventEdge) коммерческое программное обеспечение, а также и разработанный исследовательский программный код. Значительный вклад в развитие указанного научного направления внесли проф. Usui E., Strenkovski J. S., Shih A. J., Childs T. H. C., Altan T., Jawahir I. S., Klocke F, Остафьев В. А. и др.

Целью данного исследования является оценка характера и степени влияния геометрических параметров инструмента и режимов обработки на состояние поверхностного слоя изделий металлооптики из алюминиевых сплавов при алмазном микроточении.

Методика моделирования. Среди исходных данных для компьютерного моделирования одними из наиболее важных являются данные о механических свойствах обрабатываемого материала, т.е. о связи между деформация-

230

ми и напряжениями в нем. Эти свойства описываются определяющим уравнением и уравнением состояния.

В качестве определяющего уравнения в работах, посвященных изучению процессов пластической деформации различных материалов с помощью МКЭ, широко используется известная модель Джонсона-Кука

Для определения коэффициентов уравнения Джонсона-Кука была проведена серия специальных экспериментов в соответствии с методикой [1].

С этой целью из алюминиевого сплава АМг5 (табл. 1), в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84), были изготовлены специальные образцы, которые подвергались испытаниям на растяжение при температурах 25 °С, 200 °С, 400 °С.

Коэффициенты уравнения A , B , n , m , определяли, решая систему уравнений с учетом механических свойств алюминиевого сплава АМг5 (условного предела прочности ($\sigma_{0.2}$), относительного сужения (ψ_k) и относительной деформации (ϵ), полученных в ходе испытаний [1].

$$\begin{cases} \sigma_{0.2}(1+0,002) = A + B(0,002)^n \\ Bn(\epsilon^p)^{n-1}(1+\epsilon^p) = A + B(\epsilon^p)^n \\ Bn(\epsilon^p)^{n-1} = \sigma_B \\ A + B\left(\frac{\psi_k}{1-\psi_k}\right)^n = \begin{cases} \sigma(1+1,35\psi_k) & \text{при } \psi_B \leq 15\% \\ \sigma(0,85+2,06\psi_k) & \text{при } \psi_B > 15\% \end{cases} \end{cases}$$

Для решения системы уравнений и определения коэффициентов применялось специальное программное обеспечение, данные расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты определяющего уравнения

A , МПа	B , МПа	n	C	m
147	400	0,55	–	0,488

В методике реализованы геометрический и физический критерии разрушения. В качестве геометрического критерия, разделяющего материал перед режущей кромкой, используется перестроение КЭ сетки инструмента после прохождения заданного пути резания. Использование этого критерия позволяет предотвратить искажение КЭ в области больших пластических деформаций и увеличить тем самым скорость и устойчивость расчета. При моделировании применялось двумерное r -адаптивное перестроение сетки конечных элементов, используемых в задачах с плоской схемой деформации. Алгоритм, реализованный в программе LS-DYNA, создает новую сетку на основе внешней границы старой сетки. Размер генерируемых элементов определяется па-

231

аметром ADAPTOL, устанавливающим их граничную величину [2]. Время начала (TBIRTH) и конца (TDEATH) перестроения сетки определяется начальным и конечным моментами моделирования. Параметр, устанавливающий интервалы времени между перестроениями (ADPFREQ) принят равным удвоенному промежутку времени необходимому для прохождения инструментом расстояния соответствующему длине элемента вдоль оси X ($\Delta t = 2\Delta x/v$). Такой выбор интервалов перестроения обеспечивает минимизацию ошибки расчетов при минимально допустимом уровне удаленных, вследствие превышения накопленной деформацией величины физического критерия разрушения, элементов, а значит, ограничивает и уровень общей потери массы в модели обрабатываемого материала.

В качестве физического критерия разрушения пластически деформируемого материала принят критерий накопленных пластических деформаций в форме Джонсона-Кука [2]:

$$D = \sum_{\epsilon_f} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_f} \geq 1,$$

где $\epsilon_f = (D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \sigma^*)) \left(1 + D_4 \ln \epsilon \right) (1 + D_5 T)$, $D_1 - D_5$ – эмпирические

коэффициенты.

Коэффициенты для выражения, определяющего критерий разрушения, получаются с использованием тестов на растяжение-сжатие либо по литературным данным. Так на рисунке 1 представлен график зависимости критерия разрушения ϵ_f от относительного гидростатического давления σ_m/σ , построенный по данным диаграммы, приведенной в [3].

Для анализа результатов расчетов используется графический интерфейс, представленный программой LS-PREPOST, которая дает возможность просмотра полей напряжений и деформаций. Проведение предварительного расчета показателей напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала, модель которого определена в виде предложенном Джонсоном-Куком, с использованием полученных констант (табл. 1) позволило определить величины средних напряжений (гидростатического давления)

$$p = -\sigma_m = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

и эквивалентных напряжений (von Mises stress)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}.$$

232

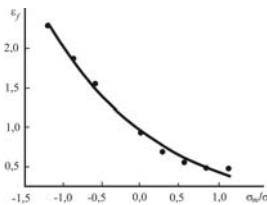


Рисунок 1 – Диаграмма пластичности алюминиевого сплава AMg5

В диапазоне условий обработки данные величины вблизи режущей кромки инструмента достигают значений $\sigma_m = 0,36$ и $\sigma = 0,296$ ГПа, а эквивалентное среднее давление – 1,22. Соответственно величина накопленной деформации для $\sigma_m = 0,36$ и $\sigma = 0,296$ ГПа составляет $\varepsilon_f = 2,3$.

При решении термомеханической задачи граничные условия состояли в жестком закреплении опорной поверхности заготовки и перемещении абсолютно-жесткого инструмента вдоль оси X заготовки с постоянной скоростью v и глубиной резания. В ходе расчета решалась 2D задача с учетом теплопроводности. Свойства материалов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Теплофизические свойства материалов

Материал	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$C_m, \text{Дж/кг}\cdot\text{K}$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{K}$	$E, \text{ГПа}$	ν	$\rho, \text{кг/м}^3$
Алмаз	–	420	1000	1050	0,1	3520
Алюминий	600	920	120	73	0,33	2650

Схема процесса моделирования показана на рис. 2.

В табл. 3 приведены условия обработки, устанавливавшиеся в ходе численных экспериментов с применением разработанной методики.

Решение контактной задачи выполнялось методом штрафов (алгоритм *CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE).

Трение на контактных площадках между инструментом и деталью при моделировании наиболее часто описывается уравнением Show M.C.

$$\tau_{\max} = \min \left(\mu(T, \sigma_n) \sigma_n; m \sigma_{\text{тек}} \left(\varepsilon^p, \varepsilon^p, T \right) \right),$$

где m – константа, определяемая экспериментально.

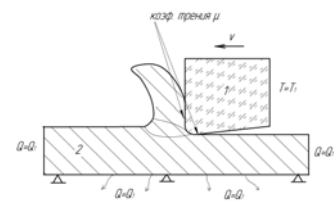


Рисунок 2 – Схема процесса моделирования (а), конечно-элементная модель реза (б)

Таблица 3 – Условия численных экспериментов

Варьируемые факторы	Стабилизированные факторы
$\rho = 50, 100, 150$ нм	$a = 150$ нм, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$
$a = 50, 150, 250$ нм	$\rho = 50$ нм, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$
$v = 60, 120, 180$ м/мин,	$a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$
$\gamma = -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$	$a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм, $v = 60$ м/мин, $\alpha = 10^\circ$

В LS-DYNA применяется аналогичная методика и максимальная сила трения ограничивается величиной $F_{\max} = A_c \cdot VC$, где A_c – площадь контакта, и VC – коэффициент вязкого трения, который можно определить по формуле: $VC = \sigma_s / \sqrt{3}$. Такая величина силы трения характерна для участка пластического контакта. На участке, где контакт является упругим, коэффициент трения монокристаллического алмазного инструмента по алюминию принимался постоянным и равным $\mu = 0,2$ [4].

Результаты моделирования. На рис. 3, а–г показаны модель процесса стружкообразования и распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в объеме зоны резания в различные моменты времени при алмазном микрооточении заготовки из алюминиевого сплава AMg-5. При врезании инструмента в обрабатываемый материал напряжения в зоне деформации быстро возрастают до величин 0,27–0,29 ГПа (рис. 3, а), степень деформации материала удаляемого в стружку в приконтактной зоне составляет 2,0–2,2, в объеме стружки (середина ее толщины) – 1,3–2,0 ($v = 60$ м/мин, $a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$). Нужно отметить, что напряжения в зоне первичных деформаций значительно превосходят предел текучести недеформированного алюминиевого сплава AMg5 (0,147 ГПа), что свидетельствует о его интенсивном упрочнении в зоне стружкообразования. Степень поперечной усадки стружки составляет $\zeta = 2,2$.

Путь резания при моделировании составлял 36 мкм, что соответствует 24-м толщинам среза. Такая длина, в соответствии с общепринятой при конечно-элементном моделировании процессов лезвийной обработки практикой, доста-

точно для адекватной оценки параметров стружкообразования в установившемся режиме резания. После достижения отмеченной длины обработки (рис. 3 в), нагрузка с заготовки снимается и в течение 0,096 с (до 20 мс) происходит расчет релаксации напряжений и упругого восстановления материала заготовки.

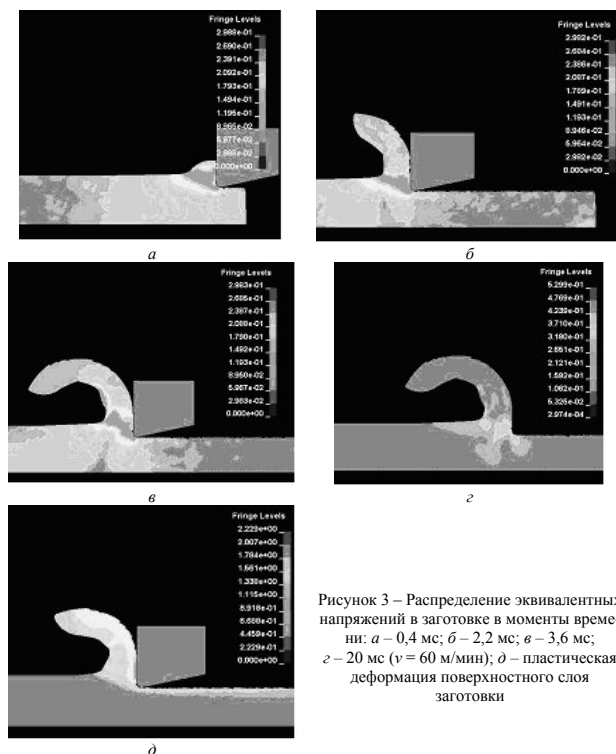


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений в заготовке в моменты времени: а – 0,4 мс; б – 2,2 мс; в – 3,6 мс; г – 20 мс ($v = 60$ м/мин); д – пластическая деформация поверхностного слоя заготовки

Распределение эквивалентных напряжений в заготовке и стружке после остановки моделирования процесса резания и последующей релаксации напряженно-деформированного состояния показано на рис. 3, г.

Для сравнительной оценки влияния переднего угла алмазного инструмента на напряженно-деформированное состояние материала в зоне резания на рис. 4 представлены результаты моделирования резания резцом с $\gamma = 10^\circ$. Остальные условия обработки аналогичны предыдущему расчету. Как видно, в данном случае, эквивалентные напряжения (рис. 4, а) практически не изменяют своей величины, а степень пластической деформации (рис. 4, б) удаляемого в стружку материала несколько ниже. Так в приконтактной зоне $\varepsilon = 1,8$ –1,95, а в объеме стружки $\varepsilon = 1,15$ –1,3. Усадка стружки также несколько меньше – ее значение не превышает $\zeta = 2,1$.

Параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя обработанных изделий являются факторами, в значительной степени обуславливающими их функциональные показатели. Высокие напряжения, действующий в зоне резания, давление на контактной поверхности округленного участка режущей кромки и задней поверхности реза с обрабатываемым материалом, упруго-пластически подминаемым алмазным инструментом, обуславливают нагружение поверхностного слоя изделия, приводя к его упрочнению и возникновению остаточных напряжений.

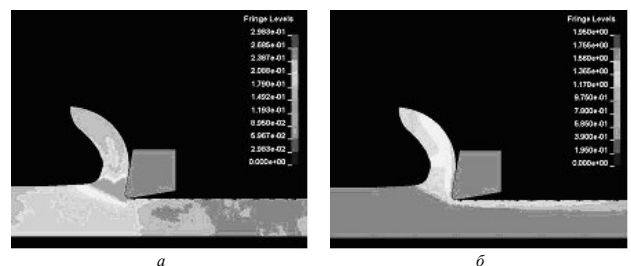


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений в заготовке в моменты времени: а – 0,4 мс; б – 10 мс ($v = 60$ м/мин)

Эпюры распределения степени деформации ε по глубине поверхностного слоя заготовки для различных условий обработки и геометрических параметров инструмента показана на рис. 5. Графики демонстрируют зависимость величины эффективной пластической деформации от условий процесса алмазного микрооточения по мере увеличения силового воздействия на обрабатываемый материал с ростом толщины среза и радиуса округления режущей кромки.

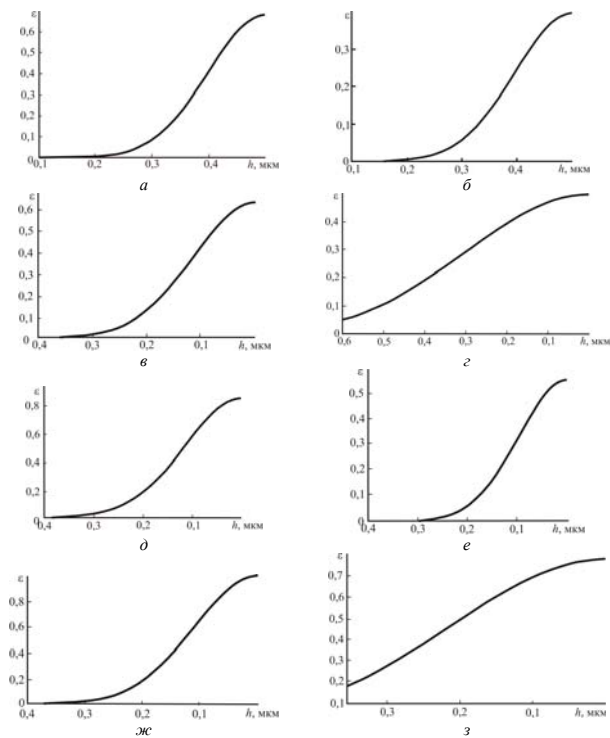


Рисунок 5 – Эпюры распределения эффективной пластической деформации материала по глубине поверхностного слоя для условий резания ($\alpha = 10^\circ$): а – $\gamma = 0^\circ$ ($v = 60$ м/мин, $a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм); б – $v = 60$ м/мин; в – $v = 10$ м/мин, ($\gamma = 10^\circ$, $a = 150$ нм, $\rho = 50$ нм); г – $v = 180$ м/мин, $\rho = 50$ нм; д – $v = 60$ м/мин, $\rho = 10$ нм ($\gamma = 0^\circ$, $a = 150$ нм.); е – $a = 50$ нм; жс – $a = 150$ нм; з – $a = 250$ нм ($\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин, $\rho = 150$ нм).
Наиболее интенсивной деформации подвергается слой заготовки толщиной 0,2–0,27 мкм, что соответствует 1,3–1,7 толщине среза.

237

Наибольшее влияние на данный параметр оказывает острота кромки режущего инструмента – деформации в поверхностном слое изделия возрастают от 0,68 ($\rho = 50$ нм) до $\epsilon = 1$ при величине $\rho = 150$ нм.

Рост толщины среза также приводит к упрочнению обработанной поверхности, но степень влияния этого параметра менее интенсивна – с ее ростом в 5 раз, величина ϵ возрастает в 1,2 раза. Степень пластической деформации в зависимости от переднего угла реза составляет от 0,76 для реза $\gamma = 10^\circ$ до 0,4 при точении инструментом с передним углом $\gamma = 10^\circ$.

Известно [5], что в процессах обработки цветных металлов алмазным лезвийным инструментом температура резания относительно низка и находится в диапазоне 60–70 °С, тем не менее, зависимость механических свойств обрабатываемого материала от температуры обуславливает влияние скорости резания на параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя. Рост скорости резания от 60 до 180 м/мин является причиной заметного (от $\epsilon = 0,68$ до $\epsilon = 0,4$) снижения величины пластической деформации материала упруго-пластически отнесенного под заднюю поверхность инструмента. При этом наиболее интенсивное снижение данного параметра наблюдается с ростом скорости резания от 120 до 180 м/мин.

Влияние различных факторов процесса алмазного микроточения на степень деформации обработанной поверхности показано на рис. 6, их ранжирование по урону влияния – на рис. 7.

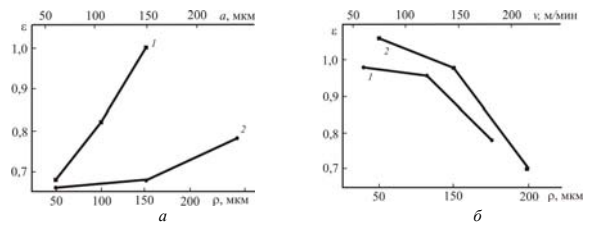


Рисунок 6 – Расчетные зависимости эффективной пластической деформации поверхностного слоя материала от параметров обработки: а – радиуса округления режущей кромки (1) и толщины среза (2); б – скорости резания (1) и переднего угла инструмента (2)

Выводы. Деформация материала поверхностного слоя изделий из алюминиевого сплава при алмазном микроточении определяется условиями обработки (режимами резания, геометрическими параметрами реза), достигая большой величины (до $\epsilon \sim 1$).

238

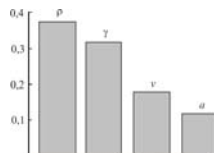


Рисунок 7 – Уровень влияния параметров обработки на степень деформации поверхностного слоя обработанных изделий

Процесс формирования поверхностного слоя обработанных изделий определяется явлениями, протекающими в зоне контакта передней поверхности и режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом. Толщина среза, радиус округления режущей кромки и передний угол реза обуславливают характер напряженно-деформированного состояния в зоне первичных деформаций, что в свою очередь определяет объем зоны, охваченной деформациями.

Повышение качества изделий металлооптики связано с формированием в их поверхностном слое зоны повышенной твердости, обеспечивающей при прочих равных условиях повышение отражательной способности обработанных поверхностей [6]. В этой связи, данные о влиянии условий алмазного микроточения на эффективную пластическую деформацию, полученных в ходе компьютерного моделирования процесса алмазного микроточения, дают возможность определить режимы обработки, способствующие повышению эксплуатационных характеристик оптических изделий: – для обеспечения эффективной деформации материала величиной 0,6–1,0 обработка должна производиться при скоростях резания 60–120 м/мин резцом с передним углом 0° , радиусом округления режущей кромки 100–150 нм; – толщина среза оказывает незначительное влияние на упрочнение обработанной поверхности, и в этой связи, ее величина должна определяться подачей, назначаемой из условия получения требуемой шероховатости обработанной поверхности.

Список использованных источников: 1. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Д. В. Криворучко; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2010. – 37 с.; 2. Криворучко Д. В. Основи 3D – моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д. В. Криворучко, В. О. Залого, В. Г. Корбач. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 209 с.; 3. Колмогоров В. Л. Напряжение, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров. – Л.: Металлургия, 1970. – 229 с.; 4. Sathyan Subbiah, Shreyes N. Melkote. Effect of finite edge radius on ductile fracture ahead of the cutting tool edge in micro-cutting of Al2024-T3 // Sathyan Subbiah, Shreyes N. Melkote. // Materials Science and Engineering A 474 (2008) 283–300.; 5. Грубый С. В. Развитие метода алмазного микроточения на сверхточных станках для обработки отражающих поверхностей металлооптики // Технология металлов. – 1999. – №5. – С. 26–30.; 6. Технологическое управление отражательной способностью поверхностей деталей металлооптики алмазным микроточением / С.А. Клименко, М.Ю. Колейкина, А.С. Манохин и др. // Инженерия поверхности и реновация изделий: Мат. 12-й междунаро. науч.-техн. конф., 4-8 июня 2012 г., г. Ялта. – К.: АТМ Украины, 2012. – С. 107–109.

Поступила в редакцию 15.04.2012

239